

CORPORACIÓN UNIVERSIDAD DE LA COSTA - CUC
GRUPO DE INVESTIGACION EN OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA (GIOPEN)
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**INFORME TECNICO EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE OPERACIÓN CONTROLADA DE
LA PLANTA EN UNA INDUSTRIA DEL SECTOR QUÍMICO.**

Elaborado por:
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA - GIOPEN

BARRANQUILLA
Noviembre-2015

Índice

1. Resumen	2
2. Objetivos de la etapa	2
3. Cronograma de ejecución del proyecto y actividades realizadas en esta etapa	2
4. Resultados principales.....	3
5. Operación controlada del área de las mesa de carga	5
5.1. Diseño y validación del indicador de eficiencia energética para el área.....	6
5.2. Línea base energética, línea meta y línea de deterioro del área de mesas de carga.....	10
5.3. Análisis de la dependencia entre los horarios de los procesos y el indicador de eficiencia energética.....	11
5.4. Análisis de procesos.....	13
5.4.1. Determinación de exceso de tiempo por circuitos	14
5.4.2. Baterías dejadas de cargar debido al exceso de tiempo por circuitos	16
5.4.3. Determinación de exceso de tiempo por proceso.....	16
5.4.4. Baterías dejadas de cargar debido al exceso de tiempo por proceso.....	19
6. Sistema de aire comprimido	19
6.1. Producción del aire comprimido.....	19
6.2. Diagnóstico de la distribución y consumo de aire comprimido.....	22
6.3. Resumen de los resultados del recorrido.....	25
Anexos.....	27

Resumen

En esta etapa se demuestra que la correlación entre la producción de baterías y el consumo de energía es bajo, por lo que no se puede utilizar como indicador y se propone utilizar como indicador la producción de baterías equivalentes, para este nuevo indicador se elaboró la línea base y la línea meta. Se identificaron los mejores y peores circuitos del área de carga a partir de lo cual se propuso un grupo de estrategias para eliminar estas pérdidas. Se midieron las fugas en el sistema de aire comprimido llegando estas a promediar un 35 %, valor muy superior a lo normado que es entre 10 y 15 %, Se propusieron un grupo de medidas para eliminar estas pérdidas y también se propuso construir un tanque pulmón de mayor tamaño. Como resultados del todo el trabajo se propone dar unos cursos de capacitación al personal de la planta que trabaja en áreas con gran consumo de energía.

1. Objetivos de la etapa desarrollada.

Tabla 1. Objetivos de la etapa desarrollada.

Etapa	Actividades
Evaluación de áreas críticas	<ul style="list-style-type: none"> Operación controlada por cada área crítica para evaluar con la mayor proyección posible consumo eléctrico y nivel de actividad Diseño y validación del indicador de eficiencia energética para el área. Identificación de oportunidades de ahorro y propuesta de mejora.

2. Cronograma de ejecución del proyecto y actividades realizadas en esta etapa.

Tabla 2. Chequeo del cronograma de ejecución.

Etapa	Semanas Ejecución																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Análisis de información preliminar	X	X																							
Evaluación energética de operación controlada de la planta			X	X	X	X	X	X	X	X															
Identificación de áreas críticas											X	X	X	X											
Evaluación de las áreas críticas															X	X	X	X	X	X	X	X			
Elaboración del informe final																							X	X	X

Tabla 3. Actividades realizadas en esta etapa.

Actividades
1. Medición en el transformador 1 que alimenta a las cargas de la empresa que no incluye a las mesas de carga. 2. Medición del colector de polvo 2. 3. Coordinación para obtener las mediciones de las mesas de carga y del sistema de aire comprimido.
1. Recorrido por la sala de mando de las mesas de carga. 2. Recopilación de las mediciones en las mesas de cargas.
1. Recopilación de las mediciones en las mesas de cargas.
1. Recopilación de las mediciones en las mesas de cargas.
1. Recorrido y mediciones en el sistema de aire comprimido. 2. Recopilación de las mediciones en las mesas de cargas.
1. Análisis e interpretación de los resultados. 2. Conformación de los informes. 3. Reuniones de trabajo.

3. Resultados principales.

Área de las mesas de carga

- El análisis de la correlación entre la producción de baterías y el consumo de energía demostró que era muy baja por lo que no se puede utilizar como Indicador de Desempeño Energético.
- Se propone un nuevo indicador de eficiencia energética para la gestión energética en el área de las mesas de carga de baterías. El indicador se basa en la producción equivalente obtenida a partir del consumo de energía de cada tipo de batería durante el proceso de carga.
- El indicador de eficiencia energética permite establecer una buena correlación de 0,86 entre la producción equivalente y el consumo de energía, lo que valida su utilidad.
- Otra herramienta empleada para la validación del nuevo indicador de eficiencia energética fue el gráfico de control del comportamiento del indicador durante los procesos de cargas analizados. En este se demostró que el indicador tiene un comportamiento estable y controlado en la mayoría de los casos, lo que reafirma su validez. No obstante, se observan algunos puntos dispersos como resultado de que todos los circuitos no tienen igual comportamiento y otros que están fuera de control.
- Se realizó un análisis con los puntos fuera de control y se evidenció la existencia de problemas técnicos y operacionales durante los procesos de carga.
- Con los puntos fuera de control filtrados, se obtuvo la línea base, la línea meta y la línea de deterioro del indicador de eficiencia energética. Con estas líneas se estimaron el potencial de ahorro de energía y el posible sobreconsumo a partir de la diferencia de las áreas bajo sus respectivas curvas. De esta

forma se hace una estimación más integral y exacta en relación a las herramientas empleadas tradicionalmente para este fin.

- La línea base energética permite la planificación y control del consumo de energía de cada proceso. La línea meta y de deterioro, permitió identificar que existe un potencial de ahorro de energía de 8,9%, y un posible sobreconsumo de energía eléctrica de igual proporción. Para un consumo mensual de 800 MWh, y teniendo en cuenta que el área de las mesas de carga representan el 60% del consumo de energía total de la empresa, significa un potencia de ahorro de energía de 42,7 MWh (\$6 000 000). El posible sobreconsumo sería de igual magnitud.
- Se realizó un análisis estadístico sobre la influencia de la hora de inicio de los procesos sobre el indicador de eficiencia energética demostrándose con una confianza de más del 90 % que tiene una influencia significativa.
- El indicador tuvo su mejor comportamiento en los procesos que inician durante el día (8:00 am - 4:00 pm), mientras que el peor comportamiento del indicador fue en los procesos que iniciaron en la tarde-noche (4:00 pm - 12:00 am).
- Se llevó a cabo un análisis de procesos para identificar los circuitos que más demoraron en cargar las baterías en un mismo proceso. Con este análisis se pudo determinar que por este concepto se perdieron 155 horas- circuito, lo que conlleva a que se dejen de cargar 394 baterías de las más pequeñas o 117 baterías de las mayores en los cuatro días analizados.
- Se identificaron procesos de carga que duraron muchos más tiempo que el requerido por los circuitos para cargar las baterías, provocando que los circuitos que lo integraban estuvieran son operar durante 871 horas- circuito. Por este concepto se pudo establecer que dejaron de cargarse 2210 baterías, considerando las que menos tiempo demoran en cargarse y 658 baterías considerando las que más se demoran en cargar.
- Se recomienda profundizar este estudio registrando datos en mayor cantidad de días de producción.

Área de los compresores de aire

- El sistema de aire comprimido según las mediciones realizadas representa el 8 % de la energía total lo que para un consumo mensual de 800 MWh equivale a 64 MWh representando un costo superior a 8,5 Millones de pesos.
- Aunque se considera por diferentes fuentes de investigación que es inevitable un nivel de pérdidas en los sistemas de aire comprimido del orden del 5 al 10 %, en sistemas sin un correcto mantenimiento estas pueden llegar hasta un 50 % de la producción de los compresores y de su consumo energético

con cuantiosas afectaciones económicas. Aunque en esta intervención no se ha podido realizar una estimación del volumen de las pérdidas al no estar disponible un inventario de los consumidores finales, ni ser posible por las características del trabajo continuo de la planta realizar una prueba de gradiente de pérdida de presión en la instalación, se presume por el diagnóstico realizado con el detector ultrasónico, la evidencia de trazas de lubricante en numerosas uniones y el régimen de trabajo sin paradas de los compresores, que estas son cuantiosas y se recomienda de inmediato la implantación de un programa para su identificación y reducción.

- El sistema de distribución es obsoleto y está diseñado para otras condiciones de operación y suministro de aire comprimido. Además ha sufrido numerosas modificaciones en sus líneas secundarias y se recomienda evaluar la factibilidad de su sustitución por uno moderno y actualizado a las condiciones de operación actuales que permitan aprovechar al máximo las prestaciones que desde el punto de vista energético tiene la estación de compresores.
- Se recomienda la elaboración e implementación de un protocolo de mantenimiento del sistema de distribución y uso del aire comprimido.
- Se recomienda desconectar lo antes de posible del circuito la instalación de la antigua casa de compresores.
- Se recomienda la realización de un inventario de los consumidores finales de aire comprimido y sus parámetros de operaciones con el objetivo de establecer la presión requerida en las líneas principales de suministro, por cada bar que se logre reducir la presión de operación del sistema se lograrían ahorros energéticos del orden del 8 % del consumo.
- Se recomienda capacitar a los operarios de los principales equipos consumidores de aire comprimido en su significación energética y las medidas para su ahorro.
- Se recomienda el diseño e implantación de sistema de trabajo que permita evaluar el comportamiento del costo de producción y el consumo del aire comprimido para evaluar sistemáticamente las medidas para su reducción.

4. Operación controlada del área de las mesas de carga.

El área de las mesas de carga de baterías constituye el principal consumidos de energía eléctrica de la empresa pues representa alrededor del 60% del consumo de la energía total. Esta área está compuesta por 17 mesas subdividas en dos partes con 6 circuitos en cada parte. En cada circuito se cargan simultaneamente 18 baterías del mismo tipo conectadas en serie.

La alimentación de cada circuito se realiza con un convertidor de potencia de 208V AC/320V DC.

El proceso de carga se programa con un sistema automático donde se define un nivel de Amperes x hora para cada tipo de baterías.

Para la ejecución de esta etapa se procesaron los datos de los principales parámetros eléctricos y de operación de las mesas de cargas correspondientes a cuatro días de producción. En la Tabla 4 se resume los días, procesos y circuitos analizados.

Tabla 4. Datos de los días, procesos y circuitos analizados.

Fechas	Total de procesos	Total del circuitos
28/08/2015 17:17	69	185
02/09/2015 14:42		

Los parámetros analizados fueron:

- Tipo de batería.
- Hora de inicio y fin de cada proceso.
- Hora de inicio y fin de cada circuito durante el proceso de carga.
- Valores de tensión, corriente, Amperes-horas (Ah) y potencia.
- Consumo de energía durante el proceso de carga.
- Temperatura.

4.1. Diseño y validación del indicador de eficiencia energética para el área.

En la Figura 1 se muestra el gráfico de Consumo de Energía vs Producción.

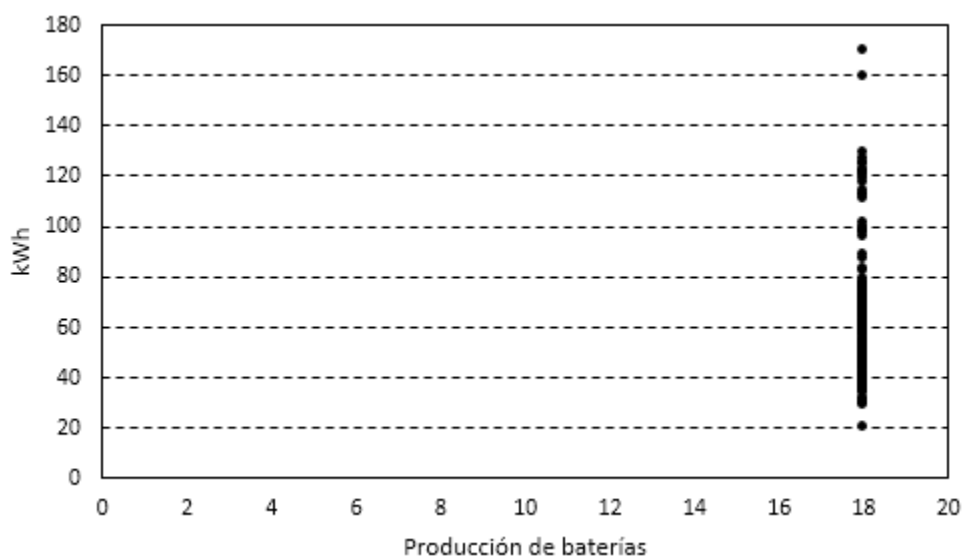


Figura 1. Gráfico de producción vs consumo de energía en kWh.

Se observa claramente que no existe una relación entre la producción de baterías y el consumo de energía. Por esta razón, se hace necesario proponer un nuevo indicador de eficiencia energética que considere el consumo de energía que requiere cada tipo de batería durante el proceso de carga.

El indicador propuesto es:

$$I_b = \frac{C_e}{P_{eq}} \quad (1)$$

donde:

I_b : Indicador de eficiencia energética propuesto (kWh/bat eq).

C_e : Consumo de energía para cargar las baterías (kWh).

P_{eq} : Producción equivalente (bat eq).

La producción equivalente P_{eq} , es la producción de baterías multiplicado por un factor k_b , que depende del consumo de energía que requiere cada tipo de batería para cargarse. Este factor se calcula como la relación entre el consumo de energía que requiere cada batería para cargarse y el menor consumo de energía requerido entre las baterías analizadas.

A continuación se describen las ecuaciones:

$$P_{eq} = P \cdot k_b \quad (2)$$

$$k_b = \frac{C_b}{C_{bmin}} \quad (3)$$

Donde:

P : Producción de baterías.

K_b : Coeficiente de batería.

C_b : Consumo de energía requerido por cada batería durante el proceso de carga (kWh).

C_{bmin} : Menor consumo de energía requerido entre las baterías objeto de estudio (kWh).

En el anexo A1 se muestra el coeficiente de cada tipo de batería analizada.

En la figura 2 se muestra el gráfico de dispersión de producción equivalente vs consumo de energía en los procesos de carga analizados. Se presenta además, el ajuste lineal con su ecuación correspondiente y el coeficiente de correlación.

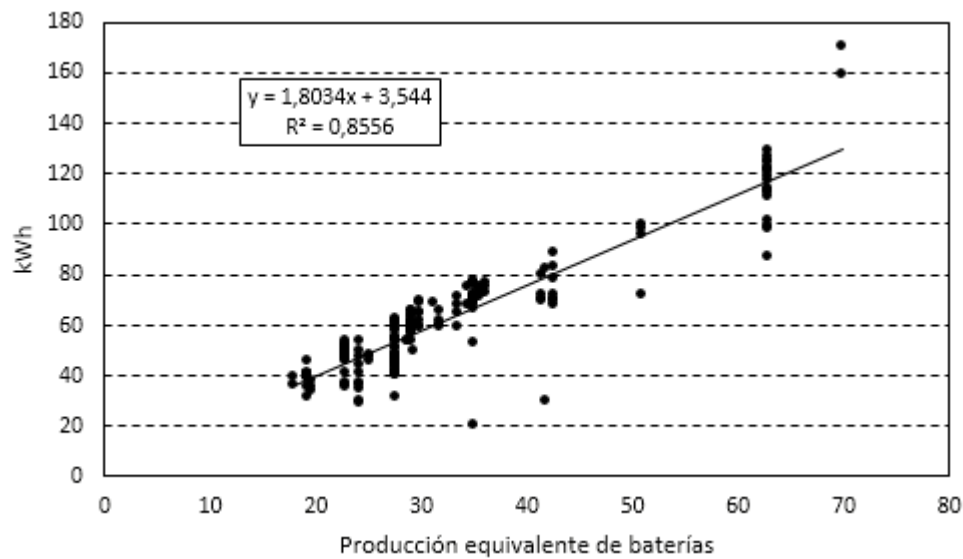


Figura 2. Gráfico de dispersión de producción equivalente vs consumo de energía en kWh.

Como se observa en esta figura, a diferencia de la figura 1, existe muy buena correlación de 0,85 entre la producción equivalente y el consumo de energía. Estos resultados validan el indicador propuesto en (1).

Otra forma de validar el indicador propuesto, es mediante el gráfico de control del comportamiento del indicador durante los procesos de cargas analizados. Como límites de control se emplea el doble de la desviación estándar sumado al promedio. En la figura 3 se muestra el gráfico de control, en la tabla 5 se presentan las principales variables estadísticas de dicho comportamiento.

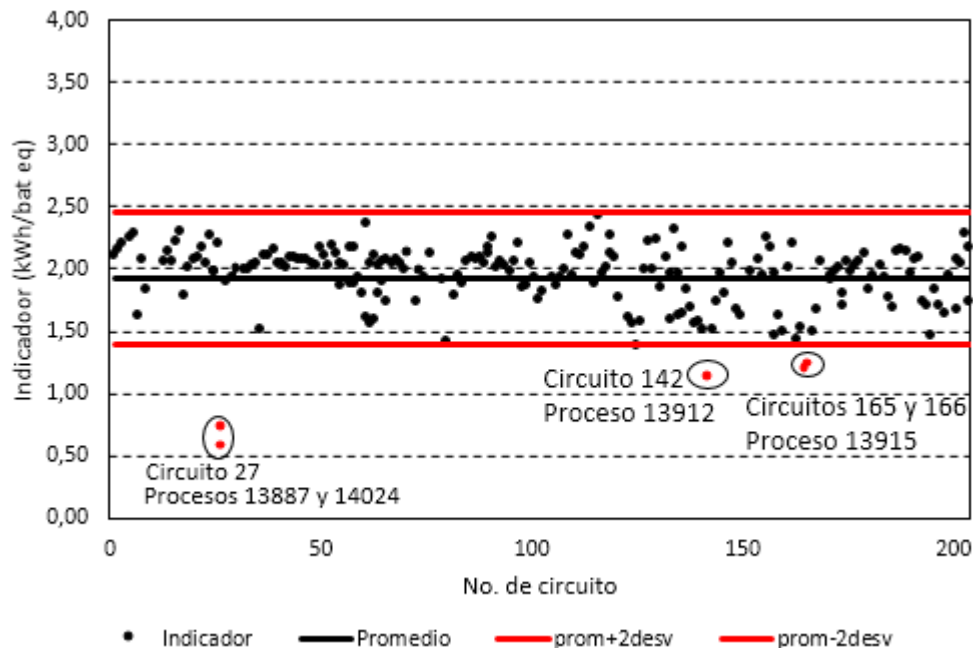


Figura 3. Gráfico de control del comportamiento del indicador durante los procesos de carga analizados.

Tabla 5. Principales variables estadísticas del comportamiento del indicador.

Variable	Máximo	Mínimo	Promedio	Desviación estándar
I _b (kWh/bat eq)	2,43	0,58	1,93	0,26

En el gráfico de control se puede observar que el indicador tiene un comportamiento estable y controlado en la mayoría de los casos, lo que reafirma la validez del indicador propuesto. No obstante, se observan algunos puntos dispersos y otros que están fuera de control. Esta variación se corrobora en la tabla 5.

Los puntos fuera de control se pueden deber a causas técnicas u operacionales. A continuación se analizan los puntos fuera de control señalados en la figura 3.

- Circuito 27, procesos 13887 y 14024: En ambos casos el nivel de tensión es muy inferior al nominal. En el proceso 13887 la tensión no supera los 131 V, sin embargo, la tensión nominal es de 320 V. Esto provoca que el consumo de energía calculado sea muy bajo. Debido a que no se observa ninguna variación significativa en los otros parámetros del proceso como la temperatura, la corriente, el tiempo de duración de la carga y los Ah, se presume que existe un problema con los sensores de medición de la tensión. En la figura 4 se observa la curva del proceso de carga 13887 del circuito 27, donde se representa el comportamiento de la tensión señalado.

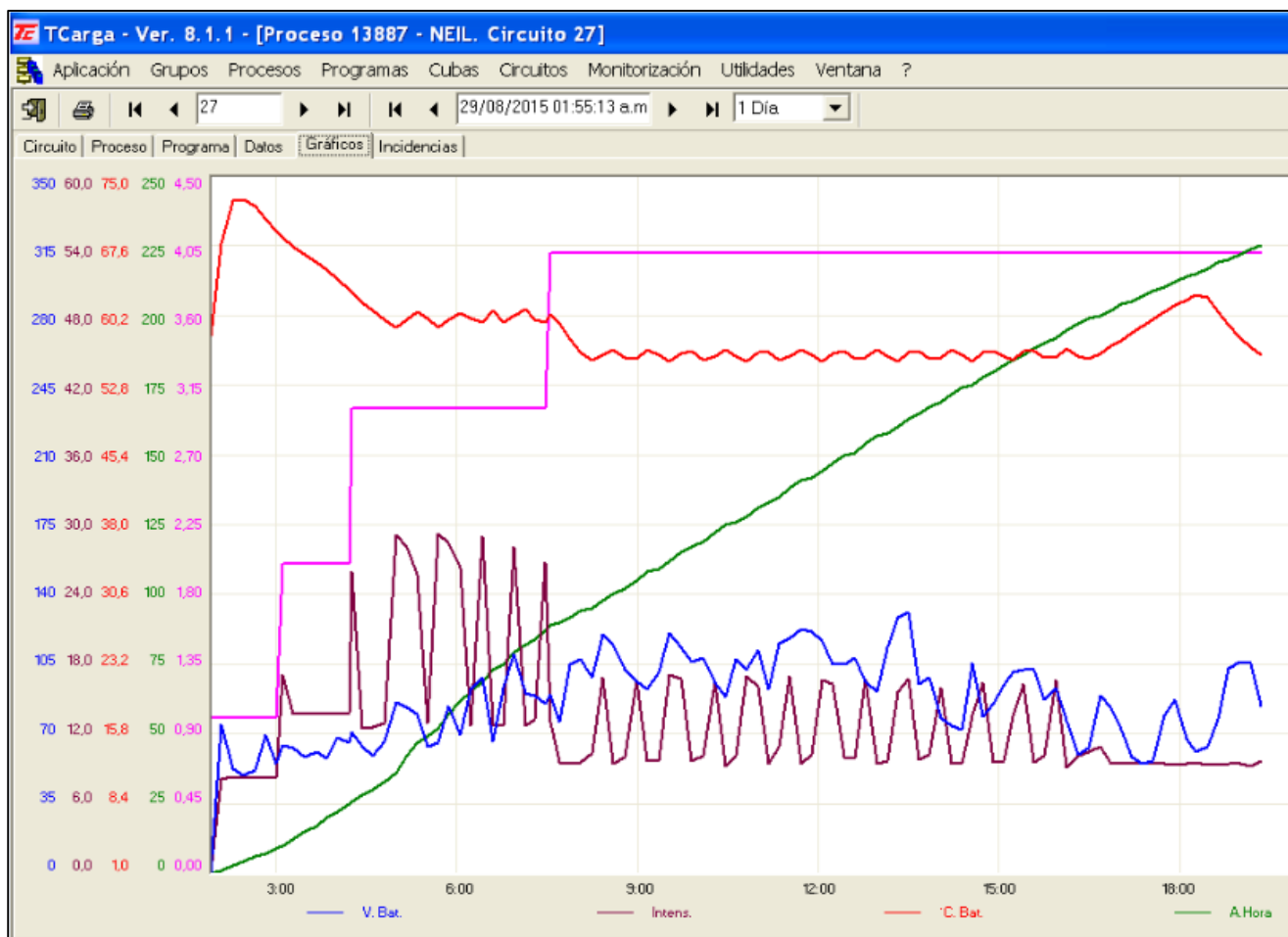


Figura 4. Proceso de carga 13887, circuito 27.

- Circuito 142 del proceso 13912 y circuitos 165 y 166 del proceso 13915: En estos procesos, los Ah programados fueron inferiores a los que le corresponde según el tipo de batería, es decir, los nominales. Esto trajo consigo un consumo de energía muy inferior al requerido en estos procesos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que si no se alcanza el valor de (Ah) nominal se puede afectar la calidad del producto. Este comportamiento probablemente se debió a problemas operacionales.

En la tabla 6 se muestra los Ah nominales y programados en estos procesos.

Tabla 6. Valores nominales y programados de (AH) del circuito 142, proceso 13912 y circuitos 165 y 166 del proceso 13915

Proceso	Circuito	Tipo de batería	Ah Nominal	Ah Programado
13912	142	22NF 22 NFS/NS 40-560 DFS	193	110
13915	165	NS 60 NS-60 510 DFS	170	109
13915	166	NS 60 NS-60 510 DFS	170	134

4.2. Línea base energética, línea meta y línea de deterioro del área de mesas de carga.

En la figura 5 se presenta la línea base energética, la línea meta y la línea de deterioro, correspondiente al área de las mesas de carga. Estas líneas se obtuvieron eliminándose los puntos fuera de las líneas de control señalados en la figura 3. Las ecuaciones de cada una de las líneas presentan un buen índice de correlación.

La línea base energética constituye una herramienta para la planificación y control del consumo de energía de cada proceso. La línea meta, obtenida con los puntos ubicados debajo de la línea base, permite determinar el potencial de ahorro energético a través de medidas de gestión, de operación y la adopción de buenas prácticas. La línea de deterioro, obtenida con los puntos que están por encima de la línea base, posibilita establecer cuanto pudiera ser el sobreconsumo de energía en las condiciones actuales de operación, si no se realizan acciones para la gestión de la energía.

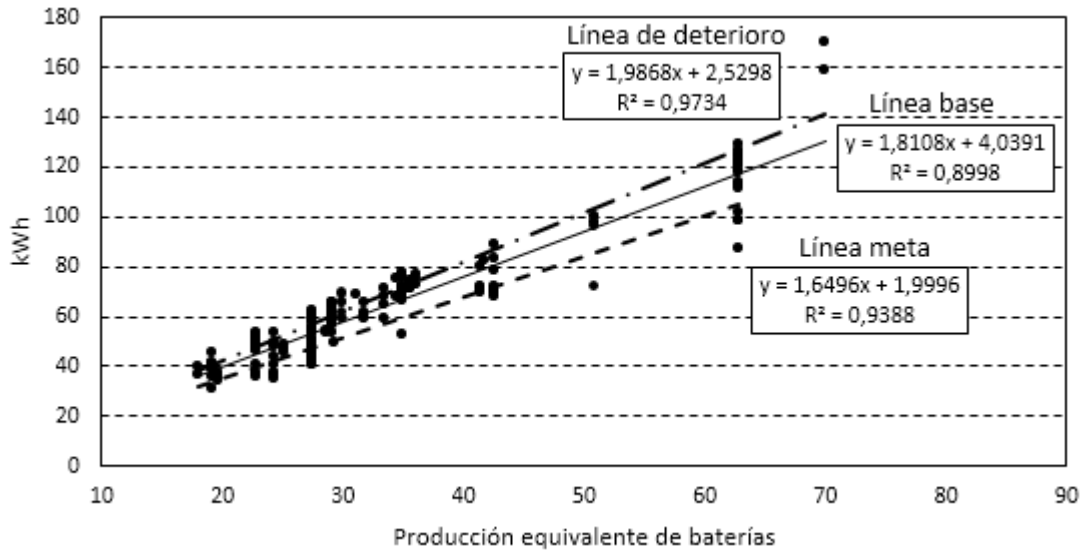


Figura 5. Línea base, línea meta y línea de deterioro.

El potencial de ahorro energético, se determina como el porcentaje que representa la diferencia entre el área debajo de la línea base y la línea meta, en relación al área debajo de la línea base.

El posible sobreconsumo energético se determina como el porcentaje que representa la diferencia entre el área debajo de la línea de deterioro y la línea meta, en relación al área debajo de la línea de deterioro.

A continuación se describen las respectivas ecuaciones:

$$P_A = 100 \cdot \frac{A_b - A_m}{A_b} \quad (\%) \quad (4)$$

$$P_S = 100 \cdot \frac{A_d - A_m}{A_d} \quad (\%) \quad (5)$$

donde:

P_A y P_S : es el potencial de ahorro y posible sobreconsumo respectivamente.

A_b , A_m y A_d : son las áreas bajo la línea base, línea meta y línea de deterioro respectivamente.

Como resultado de los cálculos, se obtuvo que el potencial de ahorro de energía es de 8,90%, y que existe un posible sobreconsumo de energía eléctrica de igual proporción

Considerando que el área de las mesas de carga, representa el 60% del consumo de energía de la empresa, se puede estimar el potencial de ahorro y el posible sobreconsumo de energía a partir del consumo de un mes típico reportado en una factura.

Si se toma como referencia el consumo de energía reportado en la factura de abril de 2015, que fue de 800 MWh, el potencial de ahorro de energía sería de 43,2 MWh, y el posible sobreconsumo de energía

sería de igual valor. Teniendo en cuenta que el costo del kWh es \$140, esto representa un ahorro potencial de \$6 000 000 mensuales y un posible gasto adicional de igual cantidad. En la tabla 7 se describen los resultados.

Tabla 7. Potencial de ahorro de energía y posible sobreconsumo de energía.

Consumo de energía (MWh/mes)	Consumo estimado en mesas de carga (MWh/mes)	Potencial de ahorro (MWh/mes)	Potencial de ahorro (\$/mes)	Posible sobreconsumo (MWh/mes)	Posible gasto adicional (\$/mes)
800	480	42,7	6 000 000	42,7	6 000 000

4.3. Análisis de la dependencia entre los horarios de los procesos y el indicador de eficiencia energética.

En la figura 6 se representa un gráfico de los horarios de inicio de los procesos de carga de los circuitos estudiados vs el indicador de eficiencia energética. En la figura se presenta además, el promedio del indicador de eficiencia energética en tres rangos de tiempo que se describe a continuación:

- Rango 1: Procesos que iniciaron en los horarios entre 12:00 am y 8:00 am.
- Rango 2: Procesos que iniciaron en los horarios entre 8:00 am y 4:00 pm.
- Rango 3: Procesos que iniciaron en los horarios entre 4:00 pm y 12:00 am.

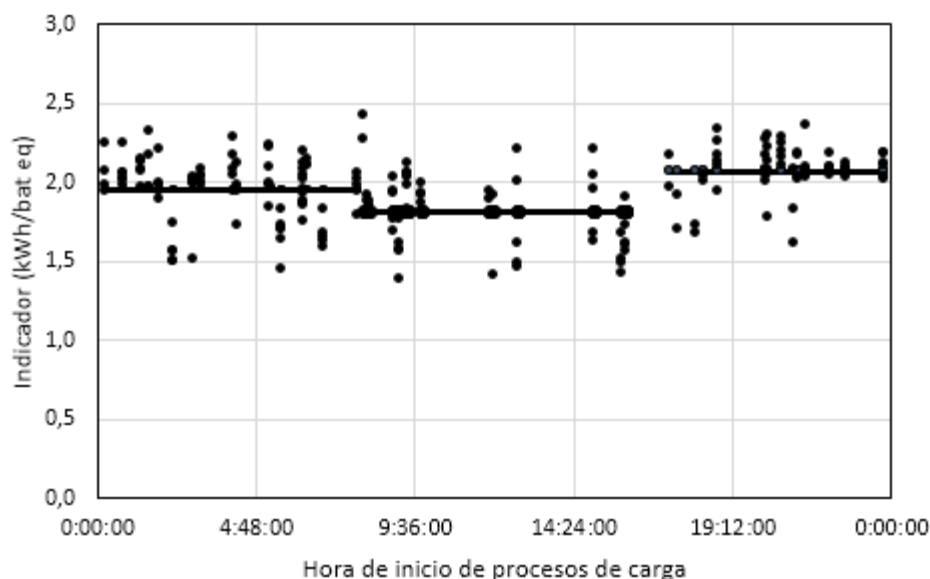


Figura 6. Comportamiento del indicador de eficiencia energética según los horarios de inicio de los procesos de carga.

El gráfico muestra que el indicador de eficiencia energética es diferente para cada uno de los rangos de hora de inicio de carga. El indicador tiene su mejor comportamiento en los procesos que inician durante

el día (8:00 am - 4:00 pm), mientras que el peor comportamiento del indicador fue en los procesos que iniciaron en la tarde-noche (4:00 pm - 12:00 am).

A continuación se presentan los resultados de un análisis estadístico que demuestra la dependencia entre el indicador de eficiencia energética y el inicio de los procesos de carga.

Análisis estadístico

Para evaluar si la hora de inicio de los procesos tiene una influencia estadísticamente significativa sobre el indicador de eficiencia energética (kWh/bat eq) en los diferentes circuitos, se realizó un análisis de regresión polinomial con el software STATGRAPHICS. Para esto, la hora de inicio de los procesos se expresó en formato de hora militar, la matriz de datos se puede apreciar en el Anexo A2.

Como resultado del análisis se obtiene la siguiente ecuación de regresión.

$$\text{kWh/bateq} = 2,118 - 0,0538 \cdot (\text{hora de inicio}) + 0,0023726 \cdot (\text{hora de inicio})^2 \quad (6)$$

En la tabla 8 se muestran los resultados del análisis de varianza.

Tabla 8. Resultados de análisis de varianza.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	2,20534	2	1,10267	30,82	0,0000
Residual	7,19241	201	0,0357831		
Total (Corr.)	9,39775	203			

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,1, existe una relación estadísticamente significativa entre kWh/bat eq y la hora de inicio del proceso con un nivel de confianza del 90%.

En la figura 7 se puede apreciar gráficamente el resultado del análisis de regresión

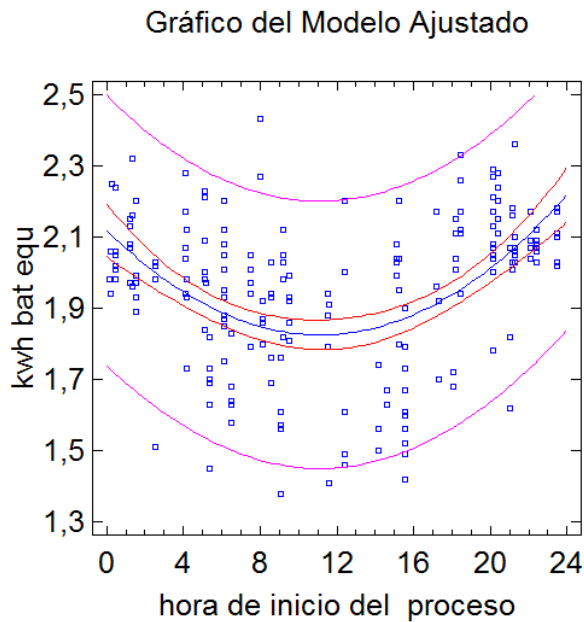


Figura 7. Análisis de regresión del indicador de eficiencia energética.

La ecuación de regresión es representada por la línea azul y las líneas violetas expresan el intervalo de confianza de un 90% en el que la variabilidad del indicador de eficiencia energética es explicada por la hora de inicio del proceso de carga.

Estos resultados confirman la dependencia entre el comportamiento del indicador de eficiencia energética y la hora de inicio de los procesos de carga.

4.4. Análisis de procesos.

El análisis de procesos consistió en los siguientes aspectos:

- Determinación de exceso de tiempo por circuitos.
- Baterías dejadas de cargar debido al exceso de tiempo por circuitos.
- Determinación de exceso de tiempo por proceso.
- Baterías dejadas de cargar debido al exceso de tiempo por proceso.

4.4.1. Determinación de exceso de tiempo por circuitos.

En este análisis se identificaron los circuitos que más demoraron en cargar las baterías en sus respectivos procesos. Para esto, se determinó en cada proceso, la relación entre el tiempo que demoró en cargarse cada circuito, sobre el tiempo empleado por el circuito que más rápido se cargó, es decir, el de menor tiempo. A continuación se describe la ecuación empleada:

$$T_{exc} = \frac{T_{circ,proc}}{T_{min,circ,proc}} \quad (7)$$

donde:

T_{exc} : Exceso de tiempo de carga de circuitos por proceso.

$T_{circ,proc}$: Tiempo que demora en cargar un circuito en su respectivo proceso (minuto).

$T_{min,circ,proc}$: Tiempo de carga del circuito que más rápido se cargó en el mismo proceso (minutos).

Este análisis es importante, pues la diferencia de tiempo de carga entre circuitos de un mismo proceso, implica que los circuitos que menos tiempo demoren en cargar, se mantienen inutilizados.

En la figura 8 se muestra el gráfico de exceso de tiempo de carga de circuito por proceso para cada circuito analizado.

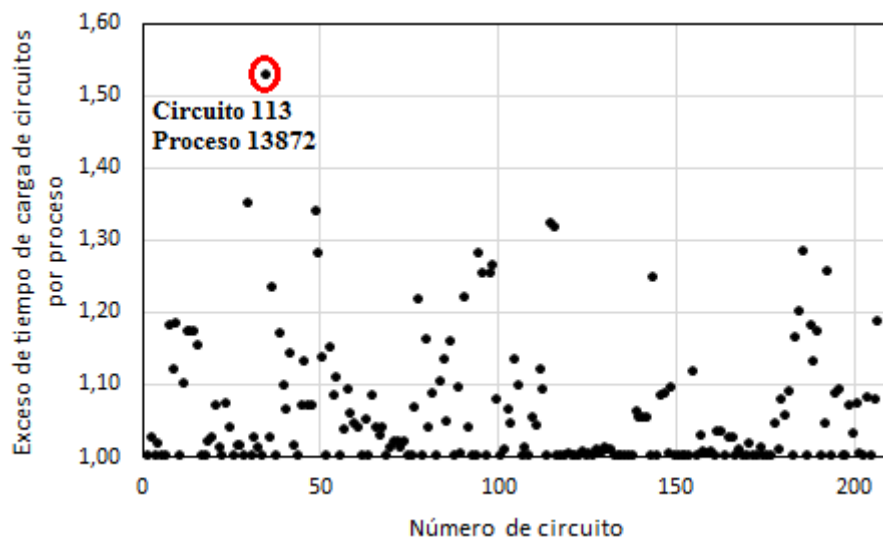


Figura 8. Gráfico de exceso de tiempo de carga de circuito por proceso.

En la figura 8 se puede observar que en un mismo proceso, la mayoría de los circuitos se cargan en tiempos diferentes. Uno de estos casos es el proceso 13872, donde el circuito 112 demoró 614 minutos (6:47 pm del 28/08/2015 a 5:01 am del 29/08/2015), mientras el circuito 113 demoró 939 minutos (6:47 pm del 28/08/2015 a 10:25 am del 29/08/2015). En este caso el circuito 113 demora 1,53 veces más que el circuito 112 y este último no puede emplearse hasta el fin del proceso.

En la figura 9 se observan ambos procesos con la diferencia de tiempo señalada.

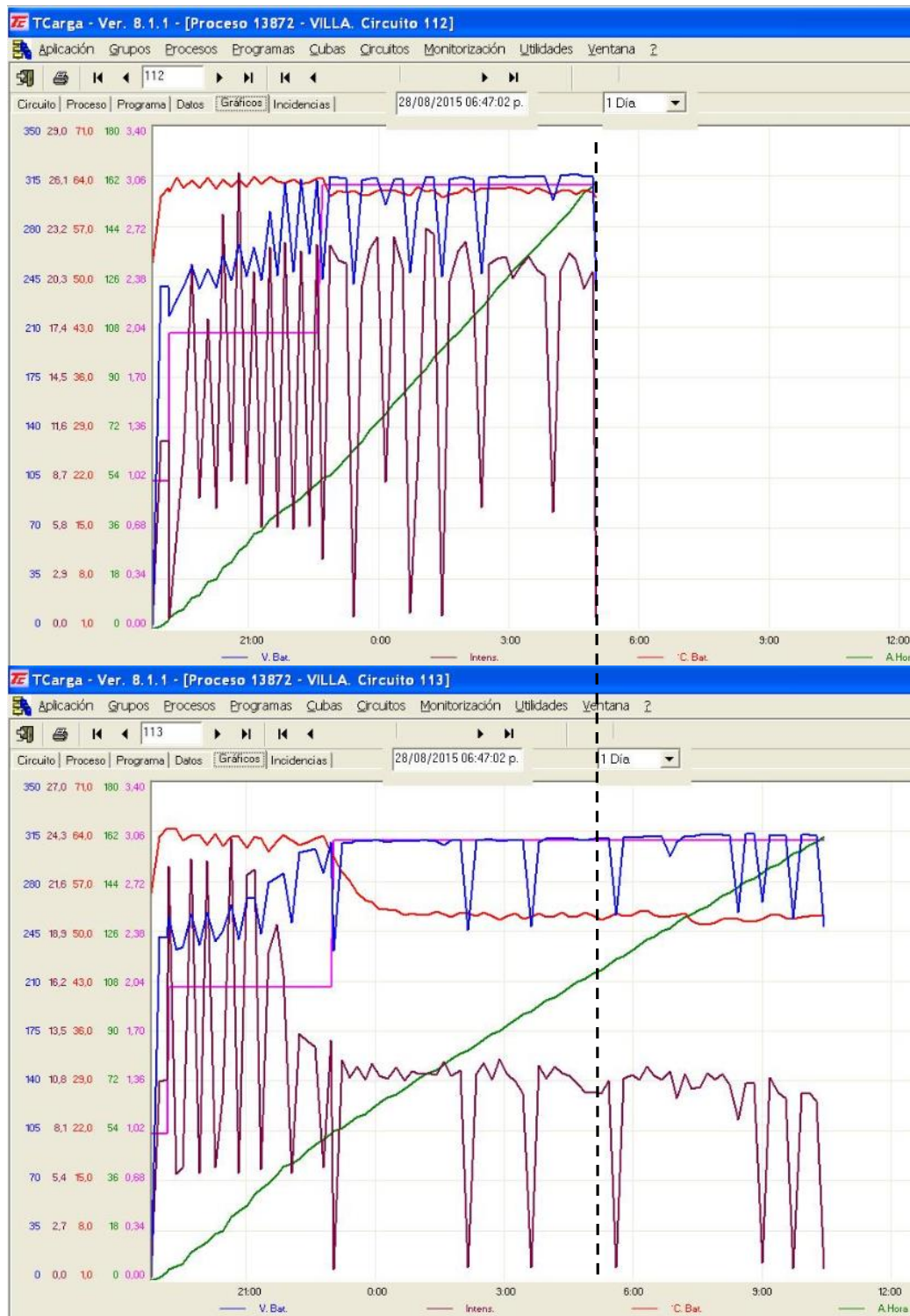


Figura 9. Procesos de carga de los circuitos 112 y 113 del proceso 13872.

4.4.2. Baterías dejadas de cargar debido al exceso de tiempo por circuitos.

Las baterías dejadas de cargar debido a la diferencia de tiempo de carga de circuitos en un mismo proceso, se calcula como la relación entre la sumatoria de los excesos de tiempo de carga de circuitos, sobre el tiempo que demora en cargar una batería.

- Si se considera la batería que menos tiempo demora en cargar:

$$B_{nc(min)} = 18 \cdot \frac{\sum T_{exc(dif)}}{T_{min(carga)}} = 18 \cdot \frac{9336}{426} = 394 \quad (8)$$

$$T_{exc(dif)} = T_{circ,proc} - T_{min,circ,proc} \quad (9)$$

donde:

$B_{nc(min)}$: Baterías dejadas de cargar debido a la diferencia de tiempo de carga de circuitos en un mismo proceso, considerando la batería que menos tiempo demora en cargar.

$T_{exc(dif)}$: Exceso de tiempo de carga de circuitos por proceso en (minutos), en términos de la diferencia entre el tiempo que demora en cargar un circuito en su respectivo proceso y el tiempo de carga del circuito que más rápido se cargó en dicho proceso.

$\sum T_{perd(circ)}$: Sumatoria del exceso de tiempo de carga de circuitos por proceso (minutos).

$T_{min(carga)}$: Tiempo de la batería que menos demora en cargar (minutos).

- Si se considera la batería que más tiempo demora en cargar:

$$B_{nc(max)} = 18 \cdot \frac{\sum T_{exc(dif)}}{T_{max(carga)}} = 18 \cdot \frac{9336}{1431} = 117 \quad (10)$$

donde:

$B_{nc(max)}$: Baterías dejadas de cargar debido a la diferencia de tiempo de carga de circuitos en un mismo proceso, considerando la batería que más tiempo demora en cargar.

$T_{max(carga)}$: Tiempo de la batería que más demora en cargar (minutos).

4.4.3. Determinación de exceso de tiempo por proceso.

El exceso de tiempo por proceso, consiste en la diferencia entre el tiempo programado en un proceso y el tiempo empleado por el último circuito en cargarse en este mismo proceso. Esta diferencia surge por deficiencias operaciones y provoca que queden circuitos inhabilitados de producir innecesariamente.

El exceso de tiempo por proceso se calcula como:

$$T_{exc,proc} = T_{proc} - T_{último,circ} \quad (11)$$

donde:

$T_{exc,proc}$: Exceso de tiempo por proceso (min).

T_{proc} : Tiempo programado en el proceso (min).

$T_{último,circ}$: Tiempo del último circuito en cargarse en este mismo proceso (min).

En la figura 10 se muestra un gráfico del exceso de tiempo en los procesos analizados.

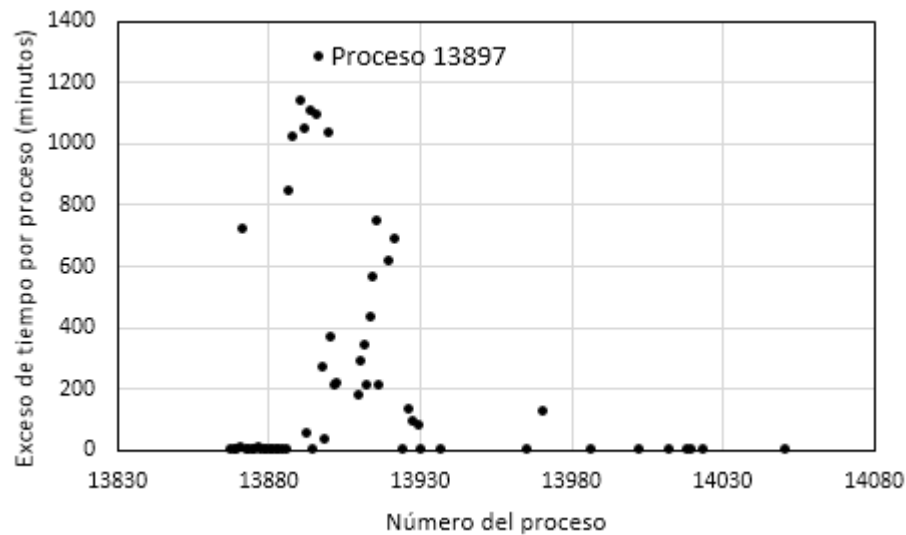


Figura 10. Exceso de tiempo por proceso.

Como se observa en la figura, en varios procesos hubo un exceso de tiempo, lo que trae consigo una afectación innecesaria en la capacidad de producción. En el proceso 13897 se cargaron 90 baterías en 5 circuitos. El proceso duró 34 horas aproximadamente, sin embargo el circuito que más demoró en cargarse lo hizo en 12:30 horas, lo que significa que los 5 circuitos estuvieron sin cargar nuevas baterías durante 21:30 horas aproximadamente.

En la figura 11 se muestra la imagen con el tiempo de duración del proceso y los gráficos con el circuito 135 que fue el que más demoró en cargar las baterías.

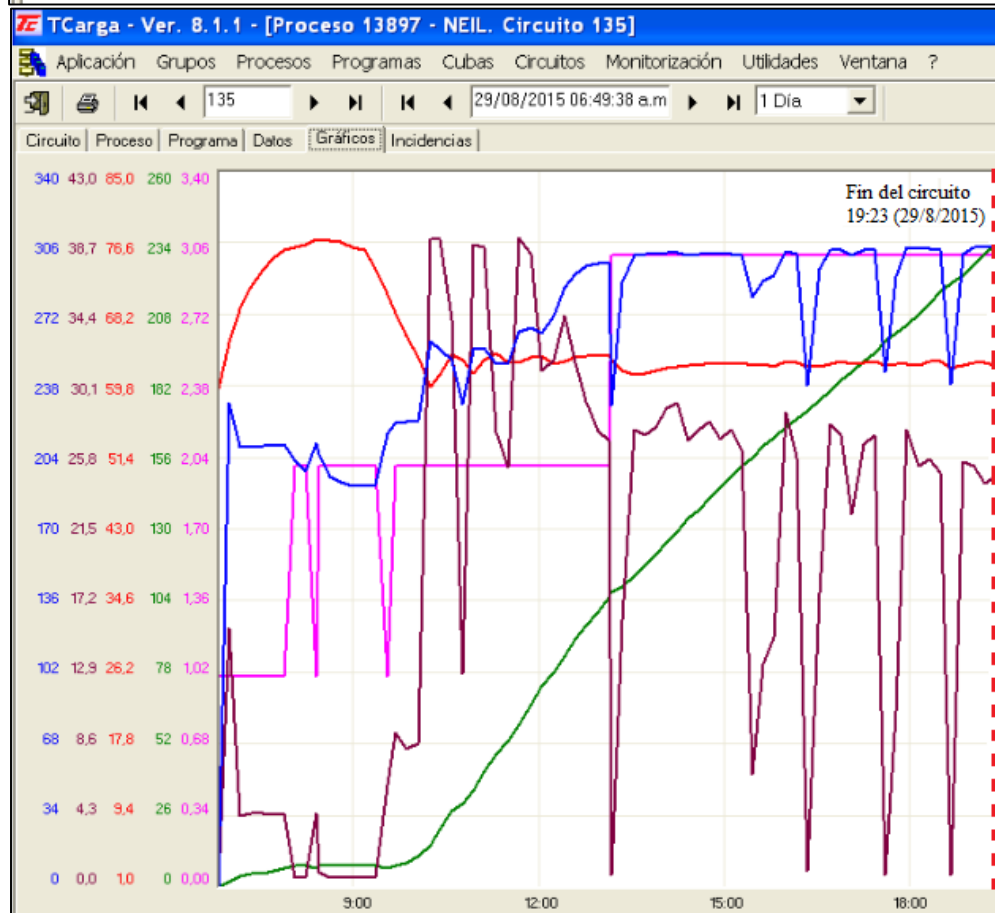
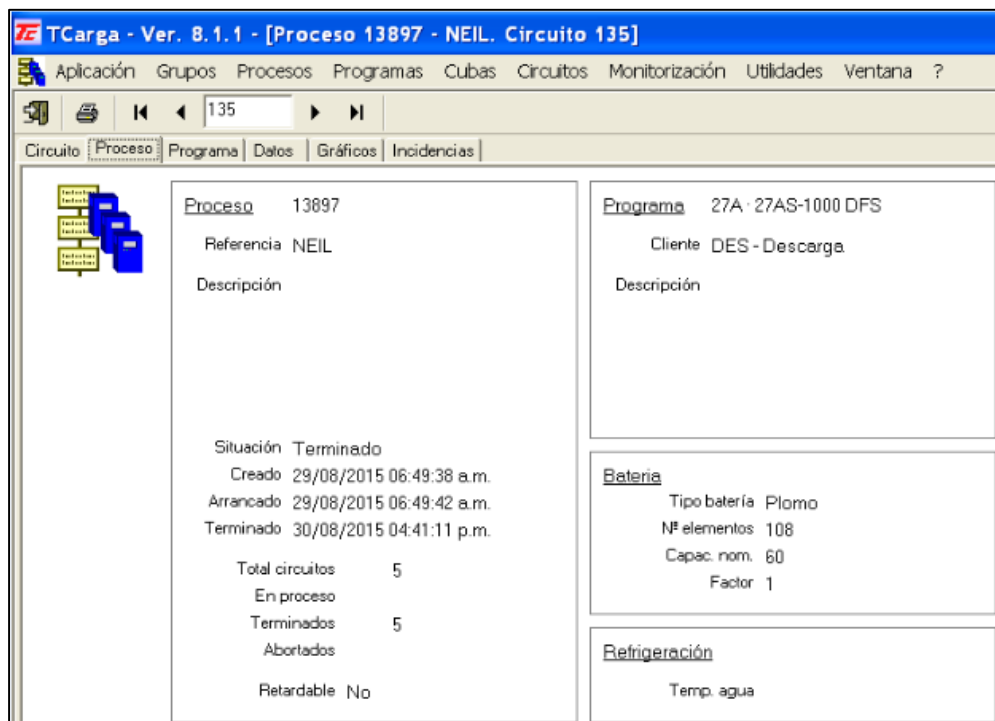


Figura 11.Datos del proceso 13897 y el circuito 135.

4.4.4. Baterías dejadas de cargar debido al exceso de tiempo por proceso.

Las baterías dejadas de cargar debido al exceso de tiempo por proceso, se calcula como la relación entre la sumatoria de los excesos de tiempo por proceso, sobre el tiempo que demora en cargar una batería.

- Si se considera la batería que menos tiempo demora en cargar:

$$B_{nc,proc(min)} = 18 \cdot \frac{\sum N_c \cdot T_{exc,proc}}{T_{min(carga)}} = 18 \cdot \frac{52312,55}{426} = 2210 \quad (12)$$

donde:

$B_{nc,proc(min)}$: Baterías dejadas de cargar debido al exceso de tiempo por proceso, considerando la batería que menos tiempo demora en cargar.

N_c : Número de circuitos por cada proceso.

- Si se considera la batería que más tiempo demora en cargar:

$$B_{nc,proc(max)} = 18 \cdot \frac{\sum N_c \cdot T_{exc,proc}}{T_{max(carga)}} = 18 \cdot \frac{52312,55}{1431} = 658 \quad (13)$$

donde:

$B_{nc,proc(max)}$: Baterías dejadas de cargar debido al exceso de tiempo por proceso, considerando la batería que más tiempo demora en cargar.

5. Sistema de aire comprimido.

El sistema de aire comprimido es el segundo consumidor de energía eléctrica con un 8,7 % del total. Este es un sistema que se puede catalogar como de alta complejidad pues abarca toda la planta con diferentes consumidores finales.

El diagnóstico del sistema se realizará según sus dos componentes fundamentales, el lado de la oferta en la generación del aire comprimido y el lado de la demanda en la distribución y consumo final.

5.1. Producción del aire comprimido.

En la figura 12 se muestra el perfil de carga en una semana normal de operaciones de la planta.

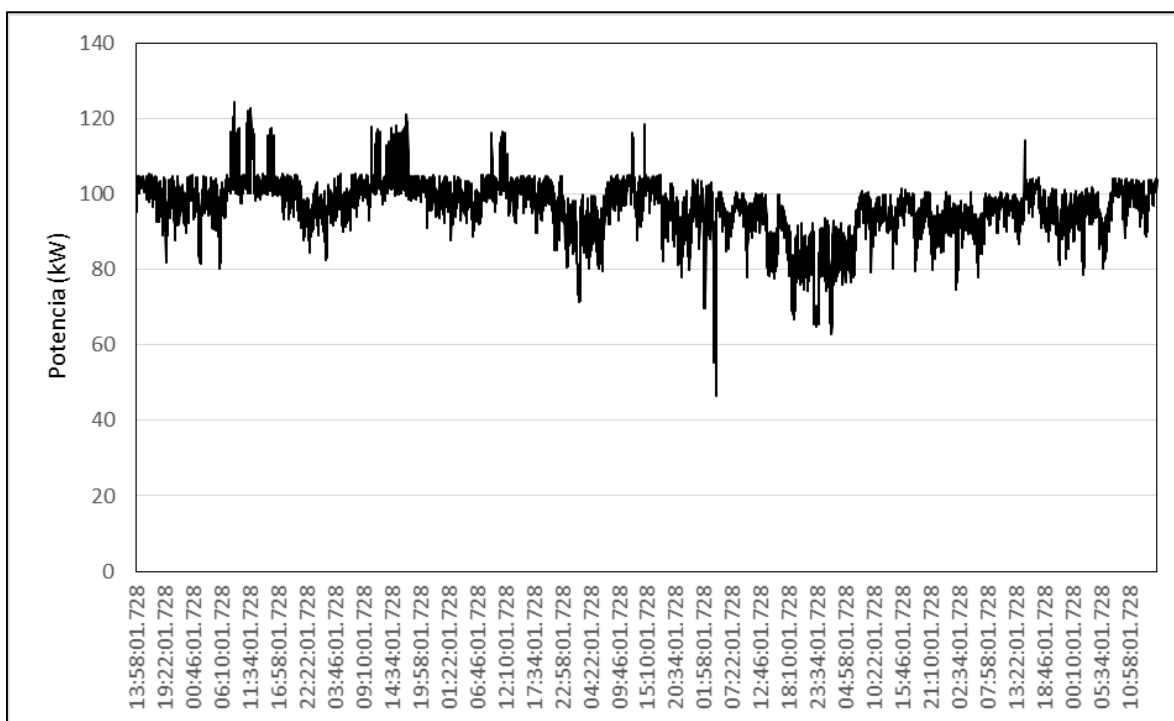


Figura 12. Perfil de carga de la estación de compresores.

En el perfil de carga elaborado a través de mediciones en siete días de operaciones se puede apreciar que hay un trabajo estable de la estación de compresores que mantiene tres unidades funcionando permanentemente y no se aprecian prácticamente paradas lo de que debe obedecer al sistema de trabajo permanente de la planta.

La estación de compresores está constituida por cuatro compresores marca KAESER modelo ASD 40S (figura 13) y una unidad secadora KAESER TF 203 (figura 14).

Las especificaciones de los compresores se pueden apreciar en la tabla 9:

Tabla 9. Especificaciones de los compresores.

Presión de operaciones (psig)	125
Caudal (cfm)	162
Potencia del motor (hp)	40



Figura 13. Compresores KAESER ASD 40S.

Los compresores son de tornillo con perfiles perfeccionados accionados por un motor eléctrico de alta eficiencia tipo IE3 y tienen incorporado un sistema de control que asegura la operación eficaz del compresor y un sistema electrónico de termogestión que regula dinámicamente la temperatura del aceite para evitar la formación de condensado que al mismo tiempo, mejora la eficiencia energética, ya que evita temperaturas finales de compresión innecesariamente altas con temperaturas de aspiración bajas.



Figura 14. Unidad secadora KAESER TF 203

La unidad secadora tiene incorporado el sistema SECOTEC de KAESER COMPRESORES que permite ahorrar una gran cantidad de energía en el secado del aire comprimido que con un eficiente control por parada diferida asegura que la unidad solo consuma energía cuando hay realmente demanda de aire comprimido seco. Los datos técnicos de la unidad se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Datos de la unidad secadora.

Pérdida de presión (psi)	2,3
Caudal (cfm)	720
Potencia efectiva consumida (hp)	2,3

Del análisis de los equipos y el perfil de carga se puede concluir que la estación de producción de aire comprimido esta actualizada tecnológicamente, tiene incorporado avances tecnológicos que aseguran su eficiencia desde el punto de vista energético y tienen un sistema de mantenimiento adecuado por lo que las oportunidades de ahorro son limitadas.

5.2. Diagnóstico de la distribución y consumo de aire comprimido.

Para la realización del diagnóstico se realizaron entrevistas al personal de operación y al personal técnico con el fin de esclarecer el nivel de atención a la distribución y uso del aire comprimido. A través de estas se estableció que:

- ✓ No hay un conocimiento pleno del significado energético del consumo de aire comprimido en la planta.
- ✓ No hay control del consumo de aire comprimido ni conocimiento acerca de los principales consumidores de la planta.
- ✓ No existe un protocolo de mantenimiento de la red de distribución de aire comprimido ni se realizan operaciones elementales como el purgado y drenaje sistemático de la red.
- ✓ A pesar de contar con el equipo requerido para esta tarea no hay un programa de detección y eliminación de fugas

Se realizó un recorrido por toda la red de distribución en el que se inspeccionó el sistema de distribución, los consumidores y se diagnosticó la presencia de fugas de aire en las uniones de la red principal y en las acometidas de la mayoría de los consumidores finales, para esto se utilizó un detector ultrasónico de fugas AMPROBE que se muestra en la figura 15.



Figura 15. Detector ultrasónico de fugas.

Como resultado del recorrido se determinó cuáles son las fugas en la línea de distribución por toda la planta, mostradas a continuación:

1. A la salida del cuarto de compresores (entrada a edificio administrativo), se identifican pérdidas de aire comprimido en tres válvulas, tres codos de 90° y tres T, además se puede identificar a simple vista debido a la contaminación de aceite que se presenta en el exterior de la tubería resultado de las fugas en uniones y otros accesorios, manifestándose en todo el trayecto fuera y dentro de la planta. Dado a las características de las marcas de aceite en la tubería, se podría deducir que las fugas han permanecido por un periodo de tiempo largo, por lo que se identifican posibilidades de ahorro.
2. En bodega # 3, se identifican pérdidas en la alimentación al colector de polvo, siendo la lectura del manómetro instalado de 9 bar, se pudo determinar que ocurren fugas en dos válvulas, cuatro codos de 90° y dos uniones. El colector incrementa la succión cada 10 segundo, provocando que se intensifique considerablemente las pérdidas de aire comprimido en estos accesorios. También de la línea de distribución, se alimenta la perforadora de caja y se encuentra fugas en los reductores de presión, pero se debe destacar que al momento del recorrido el equipo no se encontraba en funcionamiento.
3. En el colector de polvo, en bodega # 1, también se identifican fugas en tres codos, una válvula, y debido a la succión de aire comprimido cada 6 segundos, estas se intensifican considerablemente aumentando las pérdidas, sucediendo lo mismo para cada colector en la planta donde haya fuga por accesorios.
4. La tubería que transporta aire comprimido a los laboratorios, presenta fugas en dos válvulas, dos codos de 90°, y una unión T.
5. En la línea de alimentación principal que entra a la bodega # 3, se pueden identificar fugas en uniones y válvulas que forman parte de la línea principal. En la distribución hacia los equipos minicaster y strip payoff (desenrollador), se detectan fugas en las uniones. Además se debe resaltar que estas distribuciones direccionan el aire comprimido a equipos que no se encuentran funcionando provocando pérdidas innecesarias en uniones, válvulas y codos (accesorios) a la entrada de los mismos.
6. Se detectan fugas en la válvula de alimentación instalada en la apiladora de placas.
7. En el área de secado, se identifican diez cuartos de depurado con alimentación de aire comprimido cada uno, detectándose fugas en codos y válvulas instalados en la tubería de alimentación

principal y que distribuyen el aire a cada cuarto. Las revisiones se realizaron en una de las entradas ubicada en un cuarto de depurado, por tanto se debe verificar los accesorios restantes.

8. En la antigua sala de compresores se identifican cuatro ramificaciones que no están integradas a ningún equipo, por tanto no tienen participación en el proceso. Todas están selladas pero se manifiesta perdidas de aire comprimido, así mismo existen fugas en dos codos, cuatro uniones T, seis válvulas y en una de las salidas puede encontrarse un manguera con uso no identificado. Estas pérdidas pueden evitarse teniendo en cuenta que esta línea de distribución de aire comprimido no tiene participación en el proceso.
9. En el proceso de rejillado (seis máquinas de rejillado), se detecta que no existen fugas significativas comparado con las pérdidas vistas en otras áreas o procesos y verificadas en el recorrido. En el taller de mantenimiento dentro de esta área, se identifica una manguera utilizada frecuentemente para limpieza. Esta información sobre uso del aire comprimido no asociado a la producción, la ofrece el personal del área y aducen que es necesaria, pero se recomienda velar por el buen uso del mismo.
10. También se detecta fugas en colector de polvo # 1, y en la alimentación a empastadora solamente se presenta pérdidas de aire comprimido en la válvula de regulación a la entrada.
11. No se identifica fugas en la conexión de tubería principal a la entrada de bodega # 2, con el equipo de óxido # 2, pero si se manifiesta pérdidas en dos válvulas, y manómetros instalados a la entrada de este equipo.
12. En el área de ensamble, se detecta menor cantidad de fugas. Esta área se recorre de manera general, encontrándose que existen tres ensambladoras, divididas en su proceso en: ensamble, COS, probador de placas, soldado, sellado, probador de fugas. En todo el recorrido se identifican fugas en válvula de regulación instalada en la tubería que alimenta el probador de fugas. Para el caso del proceso automatizado, se evidencian fugas en la línea de acabado de bornes.
13. En el taller ubicado en la bodega # 5, se detecta línea de aire comprimido con fugas en tres válvulas, dos codos y uniones. Los reguladores también presentan pérdidas de aire comprimido. Se debe resaltar que además de la determinación dada por el instrumento utilizado para la medición, se pudo escuchar un sonido característico causado por la salida significativa de aire en accesorios, lo cual indica la magnitud de las pérdidas en este tramo. Esta línea se direcciona a área de ácido pero no se pudo conocer su uso y estado en esta zona.
14. En el área de tratamiento de agua y torres de enfriamiento no se detectan fugas significativas. Por tanto, las pérdidas por aire comprimido en esta zona es muy bajo.

5.3. Resumen de los resultados del recorrido:

- ✓ El sistema de distribución de aire comprimido fue concebido para otra estación de compresores situada en otra ubicación dentro de la planta y con característica diferentes a la actual.
- ✓ En el crecimiento y desarrollo de la planta se han incorporado equipos y nuevos consumidores finales que ha dado lugar a la inclusión de numerosos lazos de suministro con trazados accidentados y reducción de calibre desproporcionadas que incorporan perdidas sistema. Un ejemplo se muestra en la figura 16



Figura 16. Lazo de suministro anexo al sistema.

- ✓ Los consumidores finales trabajan a diferentes presiones las que se aseguran a través de válvulas reguladoras en el acceso, por lo que todo el sistema trabaja a la presión del consumidor que demanda la presión máxima de 10 bar, que son los equipos de eliminación de polvo en el aire y están al principio de la acometida.
- ✓ En el diagnóstico a las uniones y conductoras se identificaron fugas de consideración en la mayoría de ellas, evidenciándose incluso trazas de lubricante como las mostradas en la figura 17.



Figura 17. Trazas de lubricante en las uniones del sistema de aire comprimido.

- ✓ La instalación de la antigua sala de compresores se mantiene activa y conectada al sistema sin necesidad alguna y tiene incluso una toma que se muestra en la figura 18 sin destino determinado que es proclive al uso inadecuado del aire comprimido.



Figura 18. Instalación de la antigua casa de compresores y toma irregular de aire comprimido.

- ✓ Al menos en dos áreas de la empresa se identificaron tomas de aire comprimido instalado para un uso inadecuado desde el punto de vista energético para la limpieza de partes y piezas.
- ✓ Se identificó una toma sin destino establecido, esta se muestra en la figura 19.



Figura 19. Toma de aire comprimido sin destino establecido.

Anexos

Tabla A1. Coeficiente de batería para cada modelo.

Tipo de batería	Coeficiente Batería
L3 48-800 DFS	1,91
L3 48-800	1,94
L3 34-750 DFS	1,77
L3 34-950/1000 DFS	1,73
L2 24B-500	1,27
L2 24B-500 DFS	1,27
L2 24B-440 DFS	1,07
L2 24B-440	1,07
L2 24BST-700	1,86
L2 24BST-700/42-700	1,62
L2 24BST-700/42-700 DFS	1,62
L2 24B-700/42-700 DFS	1,62
L2 24B-700/42-700	1,98
L2 24B-500 DFS	1,27
22 NF 22NFS/NS40-560DFS	1,53
27 A 27 AS-1000 DFS	2,37
27 A 27A-1000	1,40
27A 27A CCA DFS	1,63
27 A 27 AS-850 DFS	1,87
27 A 27A-1000	2,33
L1 99-350 DFS	1,00
NS 60 NS-60 510 DFS	1,35
NS 60 NS-60 510	1,10
NS 60 NS-60 440	1,53
4D 4DT-1400 dfs	2,30
4D 4DT-1300 dfs	3,89
31H 31H-1100-Poste DFS	3,49
31H 31H-880-Poste DFS	2,83
24A 24A-800 DFS	2,01
24 A 24A-550 DFS	1,67
24 A 24A-440 DFS	1,67

Tabla A.2. Matriz de datos para el análisis de regresión.

Hora de inicio	kWh/bat eq	Hora de inicio	kWh/bat eq	Hora de inicio	kWh/bat eq	Hora de inicio	kWh/bat eq
0,14	1,98	5,12	1,98	9,10	1,61	22,10	2,07
0,18	2,06	5,12	2,23	9,10	1,56	22,10	2,04
0,22	1,94	5,12	1,84	9,10	1,38	22,10	2,17
0,27	2,25	5,12	2,09	9,10	1,57	22,39	2,06
0,49	2,24	5,15	1,97	9,23	2,05	22,39	2,09
0,49	2,01	5,34	1,73	9,23	1,98	22,39	2,07
0,49	2,05	5,34	1,69	9,23	2,03	22,39	2,08
0,49	2,02	5,34	1,45	9,23	2,05	22,39	2,03
0,49	1,98	5,34	1,82	9,23	2,12	22,39	2,12
0,49	2,06	5,34	1,70	9,23	1,82	23,46	2,11
1,20	1,97	5,34	1,63	9,50	1,81	23,46	2,02
1,20	2,07	6,13	1,75	9,50	1,92	23,46	2,17
1,20	2,08	6,13	2,01	9,50	1,86	23,46	2,10
1,20	2,13	6,13	2,12	9,50	1,93	23,46	2,03
1,20	2,15	6,13	2,08	9,50	1,99	23,46	2,18
1,20	2,13	6,13	1,85	11,52	1,79	18,22	2,11
1,35	1,96	6,13	1,87	11,52	1,94	18,22	2,11
1,35	2,32	6,13	2,05	11,52	1,88	18,22	2,15
1,35	1,96	6,13	1,93	11,58	1,91	14,19	1,56
1,35	2,16	6,13	1,88	11,58	1,41	14,19	1,56
1,55	1,97	6,13	1,95	12,42	2,00	14,19	1,50
1,55	2,20	6,14	2,20	12,42	2,20	14,19	1,50
1,55	1,89	6,49	1,58	12,42	1,46	14,19	1,74
1,55	1,93	6,49	1,63	12,42	1,61	15,09	2,04
1,55	1,99	6,49	1,64	12,42	1,49	15,09	2,08
2,53	1,98	6,49	1,83	14,59	1,67	15,09	2,03
2,53	1,98	6,49	1,68	14,59	1,63	15,09	1,99
2,53	2,02	7,53	2,05	15,21	1,95	15,09	1,99
2,53	2,03	7,53	1,94	15,21	1,80		
2,53	1,51	7,53	1,97	15,21	2,20		
4,08	2,04	7,53	2,01	15,21	2,04		
4,08	2,28	7,53	1,79	15,53	1,42		
4,08	2,17	8,02	2,43	15,53	1,52		
4,09	1,94	8,02	2,27	15,53	1,49		
4,15	1,73	8,12	1,92	15,58	1,79		
4,15	1,98	8,12	1,80	15,58	1,90		
4,15	1,93	8,12	1,86	15,58	1,73		
4,15	2,12	8,12	1,87	15,58	1,61		
5,12	2,00	8,57	1,69	15,58	1,56		
5,12	2,21	8,57	2,03	15,58	1,60		

Bibliografía

- Alabbasi, A., Rezki, Z., Shihada, B., (2014). Energy efficient scheme for cognitive radios utilizing soft sensing. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 701-706.
- Backlund, S., Thollander, P., Palm, J., Ottosson, M. (2012). Extending the energy efficiency gap. Energy Policy, 51, 392–396.
- Block, L., Larsen, A., Togeby, M. (2006). Empirical analysis of energy management in Danish Industry. Journal of Cleaner Production, 14(5), 516–526.
- Bunse, K., Vodicka, M., Schönsleben, P., Brühlhart, M., Ernst, F. (2011). Integrating energy efficiency performance in production management e gap analysis between industrial needs and scientific literature. Journal of Cleaner Production. 19 (6), 667-679.
- Cabello, J., Santos, V., Gutiérrez, A., Álvarez Guerra, M., Haeseldonckx, D., Vandecasteele, C. (2016). Tools to improve forecasting and control of the electricity consumption in hotels. Journal of Cleaner Production. 137(20), 803-812.
- Chen, H., Wei, Y., Luo, Y., Duan, S. (1996). Study and application of several-step tank formation of lead/acid battery plates. Journal of power sources. 59(1), 59-62.
- Chowdhury, A. (2015). How Soft Sensing Using Simulation Enhances Plant Process Management. Resource document. Cognizant 20-20 Insights. <https://www.cognizant.com/whitepapers/how-soft-sensing-using-simulation-enhances-plant-process-management-codex1186.pdf> . August 2016.
- Cope, R. C., Podrazhansky, Y. (1999). The art of battery charging. Battery Conference on Applications and Advances,. The Fourteenth Annual. Long Beach, CA, USA, 233-235.
- Cruz Viroso, I., Cabello Eras, J. J., & Sorinas González, L. (2015). Evaluación de la calidad del aire en Cienfuegos. Mejoras en el desempeño ambiental. CUBASOLAR. Revista Científica de las Fuentes Renovables de Energía, 52.
- Dahodwalla, H., Herat, S. (2000). Cleaner production options for lead-acid battery manufacturing industry. Journal of Cleaner Production. 8(2), 133-142.
- Dindorf R., “Estimating Potential Energy Savings in Compressed Air Systems”. Procedia Engineering. Vol. 39, pp 204-211. 2012
- Fawkes, S., Oung, K., Thorpe, D. (2016). Best Practices and Case Studies for Industrial Energy Efficiency Improvement. An Introduction for Policy Makers. Source of document. Copenhagen Centre on Energy Efficiency and United Nations Environment Programme (UNEP). Copenhagen. http://www.unepdtu.org/media/Sites/energyefficiencycentre/Publications/C2E2%20Publications/Best-Practises-for-industrial-EE_web.ashx?la=da. August 2016 .
- Fortuna, L., Graziani, S., Xibilia, M.G. (2005). Soft sensors for product quality monitoring in debutanizer distillation columns. Control Engineering Practice. 13(4), 499-508.

Friedman, J., Hastie, T., Tibshirani, R. (2001). The elements of statistical learning (Vol. 1). Springer, Berlin: Springer series in statistics.

Giacone, E., Mancò, S. (2012). Energy efficiency measurement in industrial processes. *Energy* 38(1), 331-345.

Gielen, D., Taylor P. (2009). Indicators for industrial energy efficiency in India. *Energy*. 34(8), 962-969.
Goldberg, A., Reinaud, J., Taylor, R. (2011). Promotion Systems and Incentives for Adoption of Energy Management Systems in Industry. Source of document. Institute for Industrial Productivity, Washington, DC, United States. <http://www.iipnetwork.org/IIP-6.%20PromotionSystemsEnMSChina1.pdf>. September 2016.

Gomnam, E., Jazayeri-rad, H. (2013). Development of an adaptive soft sensor based on FCMILSSVR. *International Journal of Scientific & Technology Research*. 2(2), 199-203.

Schluchter, M.D. (2014). Mean Square Error. Wiley StatsRef: Statistics Reference Online. DOI: 10.1002/9781118445112.stat05906.

Goytisol Espinosa, R. A., Noa Águila, J. G., Arzola de la Peña, N., Castellanos González, L., Hernández Herrera, H., López Torres, L., & Fernández Cañizares, A. (2005). Evaluación de la fractura por fatiga del cigüeñal de un motor Diesel. *Ingeniería Mecánica*, 8(2).

Di Mauro, G. F., Ferreyra, R., Suárez, J. A., & Jurado, A. D. (2015). Overvoltage by Ferroresonance on a Rural Distribution Feeder; Case Report and Simulation. *Inge-Cuc*, 11(1), 34-47.

Dodge, Y. (2008). The concise encyclopedia of statistics. Springer-Verlag. New York. United States.
E.A. Abdelaziz, R. Saidur, S. Mekhilef “A review on energy saving strategies in industrial sector” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 15, 2011, pp 150-168.

Hadid, B., Ouvrad, R., Le Brusquet, L., Poinot, T., Etien, E., Sicard, F., Grau, A. (2014). Design low cost sensors for industrial process energy consumption measurement. Application to the gas flow consumed by a boiler. In B Hadid (Ed). *Sensing Technology: Current Status and Future Trends IV.* (pp 24-46). Springer-Verlag. New York. United States.

Hernández Herrera, H., Cabello Eras, J. J., Goytisol Espinosa, R., Balbis Morejón, M. (2015). Tensiones en uniones soldadas a tope con perfiles abiertos bajo torsión. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 23(4), 638-646.

Hernández Herrera, H., Goytisol Espinosa, R., Cabello Eras, J. J., Sagastume Gutiérrez, A. (2016). Method to Calculate the Stress in Complex Welded Joints.

Hong, S.J., Jung, J.H., Han, C. (1999). A design methodology of a soft sensor based on local models. *Computers & Chemical Engineering*. 23(1), S351-S354.

Hongbo Qi, L. Aimee McKane “Improving Energy Efficiency of Compressed Air System Based on System Audit” LBNL; 2008

ISO. 2011. 50001. (2011). Energy management systems--Requirements with guidance for use. International Organization for Standardization.

ISO. 2012. 50004. (2012). Energy management systems — Guidance for the implementation, maintenance and improvement of an energy management system. International Organization for Standardization.

ISO. 2014. 50006. (2014). Energy management systems. Measuring energy performance using energy baselines (EnB) and energy performance indicators (EnPI). General principles and guidance. International Organization for Standardization.

IEC 60095-1. (2000). Lead-acid starter batteries—part 1: General requirements and methods of test.

Järvisalo, M., Ahonen, T., Ahola, J., Kosonen, A., Niemelä, M. (2016). Soft-sensor-based flow rate and specific energy estimation of industrial variable-speed-driven twin rotary screw compressor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 63(5), 3282-3289.

Jung, J., Zhang, L., Zhang, J. (2016). Lead-acid Battery technologies. Fundamentals, materials, and applications. CRC Press. Taylor & Francis Group. New York.

Kadlec, P., Gabrys, B., Strandt, S. (2009). Data-driven soft sensors in the process industry. *Computers & Chemical Engineering*. 33(4), 795-814.

Kalos, A., Kordon, A., Smits, G., Werkmeister, S. (2003). Hybrid model development methodology for industrial soft sensors. In *American Control Conference, 2003. Proceedings of the 2003* (Vol. 6, pp. 5417-5422). IEEE. Denver, United States.

Kaneko, H., Funatsu, K. (2016). Preparation of comprehensive data from huge data sets for predictive soft sensors. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 153, 75-81.

Kiessling, R. (1992) . Lead acid battery formation techniques. Source of document. Digatron Firing Circuits. http://www.digatron.com/fileadmin/pdf/lead_acid.pdf . August 2011.

Kortela, J., Jämsä-Jounela, S. L. (2012). Fuel-quality soft sensor using the dynamic superheater model for control strategy improvement of the BioPower 5 CHP plant. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 42(1), 38-48.

Leonow, S., Mönnigmann, M. (2014). Automatic controller tuning for soft sensor based flow rate control. *The International Federation of Automatic Control Proceedings Volumes*. 47, 5229-5234.

Li, Z., Luan, X., Liu, T., Jin, B., Zhang, Y. (2014). Room Cooling Load Calculation Based on Soft Sensing. In *International Conference on Life System Modeling and Simulation and International Conference on Intelligent Computing for Sustainable Energy and Environment*. (331-341). Springer Berlin Heidelberg. Berlin, Germany.

Lin, B., Recke, B., Knudsen, J.K., Jørgensen, S.B. (2007). A systematic approach for soft sensor development. *Computers & chemical engineering*. 31(5), 419-425.

Liu, J. (2016). Developing a soft sensor with online variable reselection for unobserved multi-mode operations. *Journal of Process Control*. 42, 90-103.

- Lu, B., Durocher, D., Stemper, D. (2008). Online and nonintrusive continuous motor energy and condition monitoring in process industries. Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2008. PPIC 2008. Source of document. Conference Record of 2008 54th Annual. . http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4585821. August 2016.
- Mansano, R., Rodrigues, E., Oliveira, T., Godoy, E.P. (2014) . A soft sensor for energy efficient application of wireless networked control systems. IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 4738-4744.
- Maury, Z. D. L. C. S., & Vilas, A. F. (2015). Análisis Urbano y Comunidades Inteligentes: Una Aproximación al Empleo de la Tecnología en la Movilidad Cotidiana. INGE CUC, 11(1), 9-24.
- Marwell, E., Finger, E., Sands, E. (1981). Curtis Battery Book 1. Souce of document. Curtis Instruments SA. http://evbatterymonitoring.com/WebHelp/Battery_Book.htm#Section_3.htm . September 2016.
- McAvoy, T., 1992. Contemplative stance for chemical process control. Automatic. 28(2), 441–442.
- McElroy, L., Bao, J., Yang, R.Y., Yu, A.B. (2009). Soft-sensors for prediction of impact energy in horizontal rotating drums. Powder Technology. 195(3), 177-183.
- McKane, A., Scheihing, P., Williams, R. (2008). Certifying industrial energy efficiency performance: aligning management, measurement, and practice to create market value. Source of document. Lawrence Berkeley National Laboratory. http://aceee.org/files/proceedings/2007/data/papers/56_5_049.pdf. September 2016.
- Miloloža, I. (2013). Tendencias of development of global battery market with emphasis on republic of Croatia. Interdisciplinary Description of Complex Systems. 11(3), 318-333.
- Najar, S., Tissier, J., Etien, E., Cauet, E. (2015) . Soft sensor for distribution transformers: thermal and electrical models. Sorce of document. 23rd International Conference on Electricity Distribution. CIRED 2015. Lyon, France. http://cired.net/publications/cired2015/papers/CIRED2015_0419_final.pdf . October 2016.
- Palamutcu, S. (2010). Electric energy consumption in the cotton textile processing stages. Energy. 35(7), 2945-2952.
- Pavlov, D. (2011). Lead-acid batteries: Science and technology. A handbook of lead-acid battery technology and its Influence on the product (1st Ed). Amsterdam. Elsevier.
- Pavlov, D., Petkova, G., Dimitrov, M., Shiomi, M., Tsubota, M. (2000). Influence of fast charge on the life cycle of positive lead–acid battery plates. Journal of power sources. 87(1), 39-56.
- Petkova, G., Pavlov, D. (2003). Influence of charge mode on the capacity and cycle life of lead–acid battery negative plates. Journal of power sources. 113(2), 355-362.
- Ploennigs, J., Ahmed, A., Hensel, B., Stack, P., Menzel, K. (2011). Virtual sensors for estimation of energy consumption and thermal comfort in buildings with underfloor heating. Advanced Engineering Informatics. 25(4), 688-698.
- Ponce, M., Moreno, E. (2015). Alternative definitions of energy for power meters in non-sinusoidal systems. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 64, 1206-1213.
- Poscha, A., Brudermann, T., Braschela, N., Gabriel, M. (2015). Strategic energy management in energy-intensive enterprises: a quantitative analysis of relevant factors in the Austrian paper and pulp industry. Journal of Cleaner Production. 90, 291–299.

- Prout, L. (1993). Aspects of lead/acid battery technology 4. Plate formation. *Journal of power sources*. 41(1), 195-219.
- Qi, F., Shukeir, E., Kadali, R., 2015. Model Predictive Control of Once Through Steam Generator Steam Quality. *IFAC-Papers on Line*. 48, 716-721.
- Rantik, M. (1999). Life cycle assessment of five batteries for electric vehicles under different charging regimes. *KFB – Kommunikations forsknings-beredningen*. Stockholm.
- Report Buyer Ltd., (2015). Global and China Lead-acid Battery Industry Report, 2015-2018. Source of document. Battery Industry Report. <https://www.reportbuyer.com/product/3548160/global-and-china-lead-acid-battery-industry-report-2015-2018.html>. July 2016.
- Rydh, C.J.,(1999). Environmental assessment of vanadium redox and lead-acid batteries for stationary energy storage. *Journal of power sources*. 80, 21-29.
- Rydh, C.J., Sandén, B.A. (2005). Energy analysis of batteries in photovoltaic systems. Part I: Performance and energy requirements. *Energy Conversion and Management*. 46(11), 1957-1979.
- Rudberg, M., Waldemarsson, M., Lidestam, H. (2013). Strategic perspectives on energy management: A case study in the process industry. *Applied Energy*. 104, 487–496.
- R. Saidur, N.A. Rahim, M. Hasanuzzaman “A review on compressed-air energy use and energy savings” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, 2010, pp 1135-1153.
- Samper, M. A. G., Guiliany, J. G., & Eras, J. C. (2017). EFICIENCIA EN EL USO DE LOS RECURSOS Y PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA (RECP) PARA LA COMPETITIVIDAD DEL SECTOR HOTELERO. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 11(2).
- Slišković, D., Grbić, R., Hocenski, Ž. (2012). Methods for plant data-based process modeling in soft-sensor development. *Automatika*. 52(4), 306-318.
- Sullivan, J.L., Gaines, L. 2010. A review of battery life-cycle analysis: state of knowledge and critical needs (No. ANL/ESD/10-7). Source of document. Argonne National Laboratory (ANL). https://greet.es.anl.gov/publication-batteries_lca. September 2016.
- Sullivan, J. L., Gaines, L. (2012) . Status of life cycle inventories for batteries. *Energy Conversion and Management*. 58, 134-148.
- Thanayankizil, L. V., Ghai, S. K., Chakraborty, D., Seetharam, D.P. (2012). Softgreen: Towards energy management of green office buildings with soft sensors. Source of document. Fourth International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS 2012). IEEE. Bangalore, India. <https://pdfs.semanticscholar.org/3665/f7955f5cab8d65bc1d11be81a6b1969d9bfa.pdf> . July 2016.
- Thi Minh, N. (2009). Lead acid batteries in extreme conditions: accelerated charge, maintaining the charge with imposed low current, polarity inversions introducing non-conventional charge methods. Doctoral dissertation. Source of document. Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc. France. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00443615/document> . September 2016.
- Vesma, V. (2009). Energy Management Principles and Practice. Source of document. British Standards Institution. <http://group.skanska.com/globalassets/sustainability/environmental-responsibility/energy/energy-management-bip2187.pdf>. August 2016.
- Wang, D., Liu, J., Srinivasan, R. (2010). Data-driven soft sensor approach for quality prediction in a refining process. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 6(1), 11-17.

- Warne, K., Prasad, G., Rezvani, S., Maguire, L. (2004). Statistical and computational intelligence techniques for inferential model development: a comparative evaluation and a novel proposition for fusion. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 17(8), 871-885.
- Weighall, M.J. (2003). Techniques for jar formation of valve-regulated lead–acid batteries. *Journal of power sources*. 116(1), 219-231.
- Weinert, N., Chiotellis, S., Seliger, G. (2011). Methodology for planning and operating energy-efficient production systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 60(1), 41–44.
- Wong, Y.S., Hurley, W.G. Wölfle, W.H. (2008). Charge regimes for valve-regulated lead-acid batteries: Performance overview inclusive of temperature compensation. *Journal of Power Sources*. 183(2), 783-791.
- Worrell, E., 2011. Barriers to energy efficiency: International case studies on successful barrier removal. Development Policy, statistics and research branch. Source of document. United Nations Industrial Development Organization, 1-19. . <http://dspace.library.uu.nl/handle/1874/250419> August 2016.
- Santos, V. S., Felipe, P. R. V., Sarduy, J. R. G., Quispe, E. C., & Balbis, M. (2016). Shaft Power Estimation in Induction Motor Operating Under Unbalanced and Harmonics Voltages. *IEEE Latin America Transactions*, 14(5), 2309-2315.
- S. Mousavi, S. Kara, B. Kornfeld, “Energy Efficiency of Compressed Air Systems” 21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering, *Procedia CIRP* 15 (2014) 313 – 318.
- Zeng, Z., Wang, J. (2010). Soft Sensor Modeling of Ball Mill Load via Principal Component Analysis and Support Vector Machines. In Zeng, Z., Wang, J. (Eds), *Advances in Neural Network Research and Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, pp 803-810.
- Zhang, K., Dai, X., Zhang, G., Ma, C. (2008). Left-inversion soft-sensing method for a class of nonlinear DAE sub-systems. In *Intelligent Control and Automation, 2008. WCICA 2008. 7th World Congress on* (pp. 5651-5656). IEEE. Chongqing, China.
- Zhanpei L., Xinyuan L., Tingzhang, L., Biyao, J., Yingqi, Z. (2014). Room Cooling Load Calculation Based on Soft Sensing. In: Minrui F., Chen P., Zhou, S., Yang, S, Qinglong, H (Eds). *Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany*, pp 331 – 341.
- Zhao, Z., Zeng, D., Hub, Y., Gaob, S. (2015). Soft sensing of coal quality. *Thermal Science*. 19(1), 231-242.